

Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11)

EP 0 948 143 A2

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
06.10.1999 Patentblatt 1999/40

(51) Int Cl.<sup>6</sup>: H04B 3/54, H04B 3/56

(21) Anmeldenummer: 99810219.8

(22) Anmeldetag: 11.03.1999

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
MC NL PT SE  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
AL LT LV MK RO SI

(72) Erfinder: Dzung, Dacfy, Dr.  
54330 Wettigen (CH)

(74) Vertreter: Clerc, Natalia et al  
ABB Business Services Ltd,  
SLE-I, Intellectual Property  
5401 Baden (CH)

(30) Priorität: 03.04.1998 DE 19815040

(71) Anmelder: ABB RESEARCH LTD.  
8050 Zürich (CH)

### (54) Verfahren und Vorrichtung zur Signalübertragung über Stromversorgungsleitungen

(57) Auf einer Hoch- oder Mittelspannungsleitung (1, 2, 3) werden mehrere inhaltlich unterschiedliche Signale (X1, X2, X3) übertragen. Hierzu werden die Signale zuerst linear kombiniert und dann über Koppler (8, 9, 10) in die Leitung eingespeisen. Empfängerseitig

werden die Signale entkoppelt und demoduliert. Zur Entkopplung werden adaptive Techniken verwendet, welche es erlauben, die drei Signale unabhängig von sich verändernden Übertragungseigenschaften der Leitung wieder herzustellen.

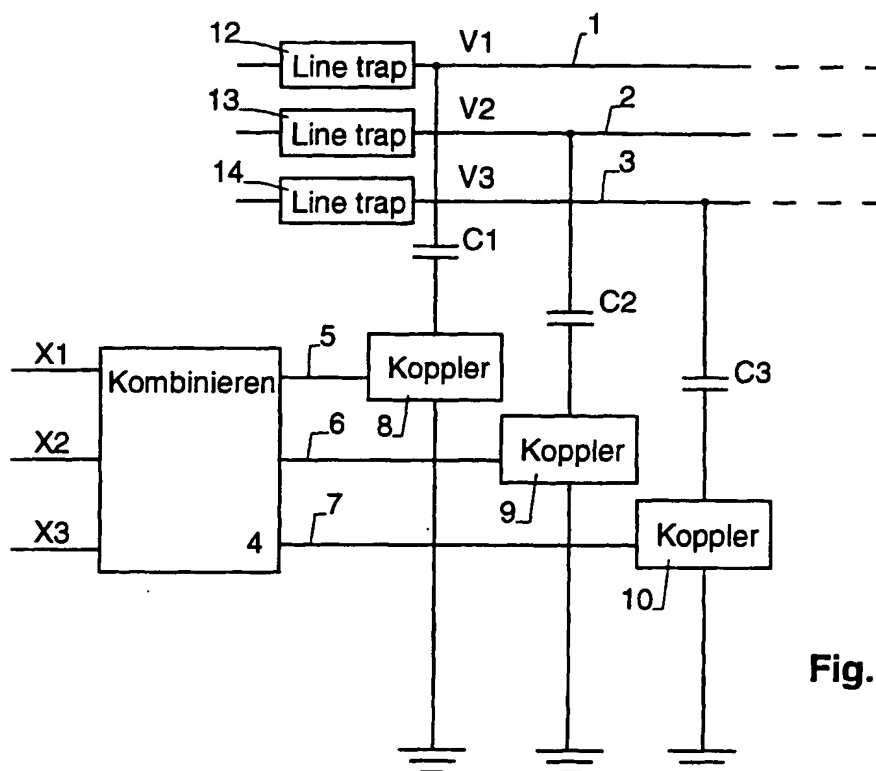


Fig. 1

EP 0 948 143 A2

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Übertragen von Signalen über eine Stromver-  
sorgungsleitung, insbesondere eine Hoch- oder Mittelspannungsleitung, gemäss Oberbegriff der unabhängigen An-  
sprüche.

[0002] Sogenannte Power Line Carrier (PLC) Systeme zur Datenübertragung über Hoch-, Mittel- oder Niederspan-  
nungsleitungen sind wohlbekannt. In der Regel wird dabei ein Datensignal, welches z.B. Steuerdaten oder Sprache  
enthält, auf einen Träger aufmoduliert, und das modulierte Trägersignal wird in eine oder mehrere der Phasen und/  
oder in eine Abschirmung der Leitung eingekoppelt. Bei der Ausbreitung des Signals entlang der Leitung kommt es  
zu einer Signalkopplung zwischen den einzelnen Leitern, so dass alle Leiter zur Signalübertragung beitragen. Am Ort  
des Empfängers wird das Signal sodann aus einem der Leiter ausgekoppelt und demoduliert.

[0003] Zur Erhöhung der Datenübertragungsraten wurde z.B. versucht, Störungen möglichst gut zu unterdrücken  
oder herauszufiltern und/oder höhere Trägerfrequenzen einzusetzen, wobei man hierbei jedoch an Grenzen physika-  
lischer Natur stösst.

[0004] Es stellt sich deshalb die Aufgabe, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung der eingangs genannten Art bereit-  
zustellen, die höhere Übertragungsraten erlaubt.

[0005] Diese Aufgabe wird vom Gegenstand der unabhängigen Ansprüche erfüllt. Erfindungsgemäss werden also  
aus mehreren inhaltlich unterschiedlichen Datensignalen mehrere unterschiedliche Sendesignale erzeugt, wobei jedes  
Sendesignal in mindestens einen der Leiter eingekoppelt wird. Bei der Ausbreitung entlang der Hoch- bzw. Mittelspan-  
nungsleitung kommt es sodann zwar zu einer Vermischung der Signale - überraschenderweise zeigt es sich aber, dass  
es möglich ist, die Signale beim Empfänger wieder zu trennen und so die ursprünglichen Datensignale zu rekonstru-  
ieren.

[0006] In einer besonders einfachen Ausführung werden die Sendesignale im Sender als eine Linearkombination  
der auszusendenden Datensignale erzeugt bzw. die Empfangssignale werden im Empfänger linear kombiniert, um die  
Datensignale zu rekonstruieren.

[0007] Die Vorschrift zum Ermitteln der Datensignale aus den Empfangssignalen wird vorzugsweise in einer Kali-  
brierungsphase ermittelt. Hierbei werden senderseitig Kalibriersignale vorbestimmter Form erzeugt und empfänger-  
seitig werden die entsprechenden Empfangssignale analysiert. Hierzu werden z.B. die Kalibriersignale derart gewählt,  
dass ihre Kreuzkorrelationen Null sind und ihre Autokorrelationen im wesentlichen Deltafunktionen entsprechen. In  
diesem Fall können durch Berechnung der Korrelation zwischen den empfangenen Signalen und den vorgegebenen  
Signalformen die Übertragungscharakteristika der Übertragungsleitung und gegebenenfalls der Koppleranordnungen  
ermittelt werden.

[0008] Durch wiederholte Kalibrierungsphase zwischen normalen Betriebsphasen wird es zudem möglich, ändernde  
Übertragungseigenschaften der Starkstromleitung, z.B. aufgrund von Witterungseinflüssen, zu berücksichtigen.

[0009] Weitere bevorzugte Ausführungen und Anwendungen ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen und  
aus der nun folgenden Beschreibung anhand der Figuren. Dabei zeigen:

Fig. 1 die senderseitige Ausgestaltung einer Hochspannungsleitung mit Schaltungselementen zum Erzeugen und  
Einkoppeln der Sendesignale und

Fig. 2 die empfängerseitige Ausgestaltung der Hochspannungsleitung nach Fig. 1 mit den Schaltungselementen  
zum Auskoppeln und Demodulieren der Empfangssignale.

[0010] Die Figuren 1 und 2 zeigen eine mögliche Ausführung der Erfindung an einer Hochspannungsleitung mit drei  
Leitern 1, 2 und 3. Jeder dieser Leiter trägt eine Hochspannung von z.B. 500 kV. Die hier gezeigten Konzepte sind  
jedoch auch bei Hoch-, Mittel- und Niederspannungsleitungen mit einer anderen Zahl und Konfiguration von Leitern  
anwendbar.

[0011] Senderseitig liegen drei inhaltlich unterschiedliche Eingangs-Datensignale X1, X2 und X3 vor. Diese können  
z.B. von drei unterschiedlichen Signalquellen stammen oder durch Seriell/Parallelumwandlung eines einzigen seriellen  
Signals erzeugt worden sein. Die Datensignale X1, X2 und X3 werden in eine Kombinierschaltung 4 eingespiessen, wo  
sie in weiter unten beschriebener Weise verknüpft werden. Die so erzeugten Signale 5, 6, 7 werden über drei Koppler  
8, 9 und 10 mit Koppelkondensatoren C1, C2 und C3 in die Leitungen 1, 2 bzw. 3 eingekoppelt und erzeugen dort  
Sendesignale mit komplexer Amplitude V1, V2 und V3. Hierzu können z.B. konventionelle Kopplerschal-  
tungen verwendet werden.

[0012] Vor der Einkopplung müssen die Signale einer Trägerfrequenz von z.B. einigen 100 kHz aufmoduliert werden.  
Dies kann entweder bereits vor der Kombinierschaltung 4 oder zwischen Kombinierschaltung 4 und Koppler 8, 9 bzw.  
10 geschehen.

[0013] In der vorliegenden Ausführung sind die Leitungen gegen eine Seite hin über sog. "Line traps" 12, 13 und 14  
abgeschirmt, so dass sich die Signale V1, V2 und V3 nur auf die andere Seite ausbreiten können. Da bei dieser

Ausbreitung die Signale der Trägerfrequenz nicht auf den drei Leitungen lokalisiert bleiben, kommt es zu einer starken Durchmischung und ausgangsseitig liegen Empfangssignale  $V'1$ ,  $V'2$  und  $V'3$  vor, die in der Regel nicht mehr die gleiche Amplitude und Phase wie die Sendesignale  $V1$ ,  $V2$  bzw.  $V3$  aufweisen.

[0014] Die Empfangssignale  $V'1$ ,  $V'2$  und  $V'3$  werden über Kondensatoren  $C4$ ,  $C5$ ,  $C6$  und Koppler 20, 21, 22 ausgekoppelt und über drei Leitungen 23, 24, 25 einer Trennschaltung 26 und einer Rückrechnungsschaltung 27 zugeführt. In diesen Schaltungen werden die Empfangssignale sodann in einer weiter unten beschriebenen Weise getrennt und verarbeitet, um die ursprünglichen Datensignale  $X1$ ,  $X2$  und  $X3$  zu erhalten. Trennung und Rückrechnung können auch in einem einzigen Schritt bzw. einer kombinierten Auswerteschaltung gleichzeitig stattfinden.

[0015] Die empfangenen Signale müssen vor einer Verarbeitung von der Trägerfrequenz getrennt werden. Dies kann entweder vor oder nach der Trennschaltung 26 und der Rückrechnungsschaltung 27 geschehen.

[0016] Die vorliegende Erfindung beruht auf der Erkenntnis, dass über eine Leitung mit  $k$  Leitern in der Regel bis zu  $k$  PLC-Signale gleicher Frequenz übertragen werden können. Hierzu werden die senderseitigen Sendesignale  $V1$ ,  $V2$ ,  $V3$  als eine Linearkombination der Eingangs-Datensignale  $X1$ ,  $X2$  und  $X3$  erzeugt. In Matrix-schreibweise:

$$V = C1 \cdot X, \quad (1)$$

wobei  $V$  der Vektor  $\{V1, V2, \dots, V_k\}$  der Sendesignale,  $X$  der Vektor  $\{X1, X2, \dots, X_m\}$  der Eingangs-Datensignale und  $C1$  eine Matrix der Verknüpfungskoeffizienten ist.

[0017] Die empfangenseitigen Spannungssignale  $V' = \{V'1, V'2, \dots, V'k\}$  sind

$$V' = H \cdot V + N, \quad (2)$$

wobei die  $k \times k$ -Matrix  $H$  die verallgemeinerte Transfermatrix der Leitung und  $N$  ein additives Rauschen ist. In der Trennschaltung 26 werden aus den Empfangssignalen  $V'$  die Ausgangssignale  $Y = \{Y1, Y2, \dots, Y_m\}$  durch lineare Kombination berechnet:

$$Y = C2 \cdot V', \quad (3)$$

Somit gilt

$$Y = C2 \cdot H \cdot C1 \cdot X + C2 \cdot N = A \cdot X + g \quad (4)$$

wobei  $A$  als Kanalmatrix und  $g$  als Rauschvektor bezeichnet wird. Gleichung (4) wird in der Rückrechnungsschaltung 27 näherungsweise nach  $X$  aufgelöst:

$$X = L \cdot Y, \quad (5)$$

[0018] In erster Näherung kann unter Vernachlässigung des Rauschens  $L = A^{-1}$  gesetzt werden. Stabilere Verfahren mit kleinster quadratischer Abweichung sind jedoch bekannt, siehe z.B. G. Strang, *Linear Algebra and its Applications*, Hartcourt Brace Javonich, 1988. Wenn  $X$  ein komplexes Vektorsignal mit bekanntem Spektrum ist, können auch Wiener-Filter-Verfahren angewendet werden, siehe z.B. B. D. O. Anderson and J. B. Moore, *Optimal Filtering*, Prentice-Hall, 1979.

[0019] Die auf diese Weise erhaltenen Werte von  $X$  können sodann den normalen Demodulations- und Detektionsstufen zugeführt werden.

[0020] Die Werte der Matrix  $A$  hängen von den verwendeten Abbildungen  $C1$  und  $C2$  und den geometrischen und elektrischen Eigenschaften der Übertragungsleitung, d.h. von der Transfermatrix  $H$ , ab. Es ist möglich, dass die Charakteristika der Leitung so sind, dass  $A$  praktisch singulär ist, so dass eine zuverlässige Trennung der Signale verunmöglicht wird. Dies kann, wie weiter unten beschrieben, unter Umständen durch geschickte Wahl von  $C1$  und  $C2$  vermieden werden. Ansonsten ist die Dimension  $m$  von  $X$  zu reduzieren.

[0021] Die Matrix  $C1$  der Verknüpfungskoeffizienten wird in einer einfachsten Ausführung so gewählt, dass in jeder Zeile nur ein Wert ungleich Null steht, d.h. es wird jedes Signal  $X_i$  in genau einen der Leiter 1, 2 bzw. 3 eingekoppelt. Insbesondere wenn die Hoch- bzw. Mittelspannungsleitung homogen ist, bietet es sich jedoch auch an,  $C1$  so zu wählen, dass mindestens ein Teil der Signale  $X_i$  direkt in genau eine der Moden der Leitung eingekoppelt wird. So

kann z.B. im Falle von  $k=3$  und  $m=3$   $C1$  gewählt werden als:

$$C1 = M = \begin{bmatrix} -0.5 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ -0.5 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

wobei  $M$  die modale Matrix ist, die die Transfermatrix  $H$  eines homogenen Leitungsabschnitts diagonalisiert. Wie in F. Eggimann, W. Senn und K. Morf, *Die trägerfrequenten Übertragungseigenschaften von Hochspannungsleitungen*, Brown Boveri Mitteilungen 8-77 ausgeführt wird, diagonalisiert  $M$  im wesentlichen auch die Transfermatrizen einiger anderer Konfigurationen.

[0022] Mit der Wahl gemäss Gleichung (6) werden  $X1$  und  $X2$  direkt in die zwei Ausbreitungsmoden eingekoppelt, die sich unabhängig voneinander fortpflanzen. (In der Praxis genügt es, wenn die Spalten von  $C1$  proportional zu jenen gemäss Gleichung (6) sind.)

[0023] Empfängerseitig wird  $C2 = M^{-1}$  gewählt, so dass die Kanalmatrix  $A$  diagonal wird und  $X1$  und  $X2$  bereits praktisch getrennt vorliegen.

[0024] In vielen praktischen Anwendungen ist die Leitung jedoch nicht homogen, so dass eine kompliziertere Matrix  $C1$  bzw.  $C2$  gefunden werden muss, um die die Kanalmatrix  $A$  zu diagonalisieren. In diesem Falle wird  $C1$  wie oben beschrieben vorzugsweise so gewählt, dass in jeder Zeile und Spalte genau ein Element ungleich Null vorhanden ist. Allerdings ist es auch denkbar, mittels Eichmessungen an der Leitung eine Form von  $C1$  bzw.  $C2$  zu finden, die die Kanalmatrix  $A$  besser invertierbar macht.

[0025] Zur Lösung der Gleichungen (4) oder (5) muss die Kanalmatrix  $A$  bekannt sein. In den meisten praktischen PLC-Systemen kann  $A$  nicht theoretisch ermittelt werden und kann sich ausserdem z.B. witterungsbedingt ändern. Es werden deshalb Kalibrierungsmessungen durchgeführt, um  $A$  experimentell zu ermitteln. Hierzu erzeugt der Sender Kalibrierungssignale  $\chi_i$ , einerseits nach der Inbetriebnahme, andererseits in regelmässigen Abständen im Normalbetrieb, so dass z.B. witterungsbedingte Änderungen der Kanalmatrix  $A$  kompensiert werden können. Der Empfänger, der die Form der Kalibrierungssignale  $\chi_i$  kennt, ermittelt daraus die Koeffizienten von  $A$ . Im zweidimensionalen Fall wird Gleichung (4) dann z.B. zu:

$$Y1(t) = A_{11} \cdot \chi_1(t) + A_{12} \cdot \chi_2(t) + g_1(t) \quad (7)$$

$$Y2(t) = A_{21} \cdot \chi_1(t) + A_{22} \cdot \chi_2(t) + g_2(t).$$

[0026]  $\chi_1(t)$  und  $\chi_2(t)$  werden so gewählt, dass deren Kreuzkorrelationen im wesentlichen 0 sind und dass deren Autokorrelationen im wesentlichen Deltafunktionen entsprechen, d.h. nur für eine Verschiebung von 0 ungleich Null sind. Hierzu können z.B. künstliche Rauschsignale verwendet werden. Somit können durch Korrelation von  $Y1$  und  $Y2$  mit  $\chi_1$  und  $\chi_2$  die Koeffizienten von  $A$  direkt ermittelt werden.

[0027] In den obigen Ausführungen wurde davon ausgegangen, dass die Kanaltransfermatrix  $H$  über den Frequenzbereich des PLC-Signals frequenzunabhängig ist. Im allgemeinen ist die Transferfunktion jedoch frequenzabhängig. In diesem Fall wird z.B. Gleichung (7) verallgemeinert zu:

$$Y1(t) = A_{11} * \chi_1(t) + A_{12} * \chi_2(t) + g_1(t) \quad (8)$$

$$Y2(t) = A_{21} * \chi_1(t) + A_{22} * \chi_2(t) + g_2(t),$$

wobei  $*$  die Faltung mit den Impulsantworten  $A_{ij}(t)$  kennzeichnet.

[0028] Die Erfindung kann auch auf diesen Fall angewendet werden. Die hierzu notwendigen Verfahren sind dem Fachmann bekannt. Es sei insbesondere auf die Methode der Wiener-Filterung verwiesen, siehe z.B. B. D. O. Anderson und J. B. Moore, *Optimal Filtering*, Prentice-Hall 1979.

[0029] Für die Übertragung digitaler Daten haben die Signale  $\chi_i$  die Form

$$X_i = \sum \alpha_{ik} g(t-kT), \quad (9)$$

wobei  $\alpha_{ik}$  das quadraturamplituden-modulierte Datensymbol der i-ten Übertragung ist,  $g(t)$  die Pulsform und  $T$  die Symbolperiode (siehe J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 1983). Da die Folge  $\alpha_k$  lediglich eine lineare Transformation des Signals  $X = X(t)$  ist, kann die Erfindung unter Verwendung bekannter Verfahren direkt auf diesen Fall ausgedehnt werden. In N. Amitay und J. Salz, *Linear equalization theory in digital data transmission over dually polarized fading radio channels*, AT&T Bell Lab. Techn. J., Vol.63, pp. 2215-2259 wird die Lösung eines mathematisch gleichwertigen Problems in einem anderen Übertragungssystem beschrieben.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Übertragen von Signalen über eine Stromversorgungsleitung, insbesondere eine Hoch- oder Mittelspannungsleitung, mit mehreren Leitern, dadurch gekennzeichnet,

dass aus mehreren inhaltlich unterschiedlichen Datensignalen ( $X_1, X_2, X_3$ ) mehrere inhaltlich unterschiedliche Sendesignale ( $V_1, V_2, V_3$ ) erzeugt werden,

dass jedes Sendesignal senderseitig in mindestens je einen der Leiter (1, 2, 3) eingekoppelt wird,

dass empfangsseitig aus mehreren der Leiter (1, 2, 3) mehrere Empfangssignale ( $V'_1, V'_2, V'_3$ ) ausgekoppelt werden, und

dass zur Ermittlung der Datensignale ( $X_1, X_2, X_3$ ) die Empfangssignale rechnerisch miteinander verknüpft werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Sendesignale ( $V_1, V_2, V_3$ ) eine Linearkombination der Datensignale ( $X_1, X_2, X_3$ ) sind.

3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass empfangsseitig die Datensignale als Linearkombination der Empfangssignale ( $V'_1, V'_2, V'_3$ ) ermittelt werden.

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch mindestens eine Kalibrierungsphase, in welcher senderseitig Daten- oder Sendesignale vorbestimmter Form erzeugt und die entsprechenden Empfangssignale analysiert werden, und dass daraus eine Vorschrift zum Ermitteln der Datensignale aus den Empfangssignalen ( $V'$ ) abgeleitet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Daten- bzw. Sendesignale vorbestimmter Form ( $\chi$ ) derart sind, dass ihre Kreuzkorrelationen im wesentlichen Null sind und ihre Autokorrelationen im wesentlichen Deltafunktionen entsprechen.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen einem normalen Betrieb wiederholt Kalibrierungsphasen eingeschaltet werden.

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Sendesignale ( $V_1, V_2, V_3$ ) derart aus den Datensignalen ( $X_1, X_2, X_3$ ) kombiniert werden, dass mindestens eines der Datensignale genau einen Mode der Stromversorgungsleitung (1, 2, 3) anregt.

8. Vorrichtung zur Signalübertragung mit einer Stromversorgungsleitung mit mehreren Leitern (1, 2, 3) gekennzeichnet durch

eine Kombinier- und Einkopplerschaltung (4, 8, 9, 10) zur Erzeugung mehrerer inhaltlich unterschiedlicher Sendesignale ( $V_1, V_2, V_3$ ) aus mehreren inhaltlich unterschiedlichen Datensignalen ( $X_1, X_2, X_3$ ) und zur Einkoppelung der Sendesignale ( $V_1, V_2, V_3$ ) in mehrere der Leiter (1, 2, 3), und  
eine Auskoppler- und Auswerteschaltung (20, 21, 22, 26, 27) zum Auskoppeln von Empfangssignalen ( $V'_1, V'_2, V'_3$ ) aus mehreren der Leiter (1, 2, 3) und zum Ermitteln der Datensignale ( $X_1, X_2, X_3$ ) aus den Empfangssignalen ( $V'_1, V'_2, V'_3$ ).

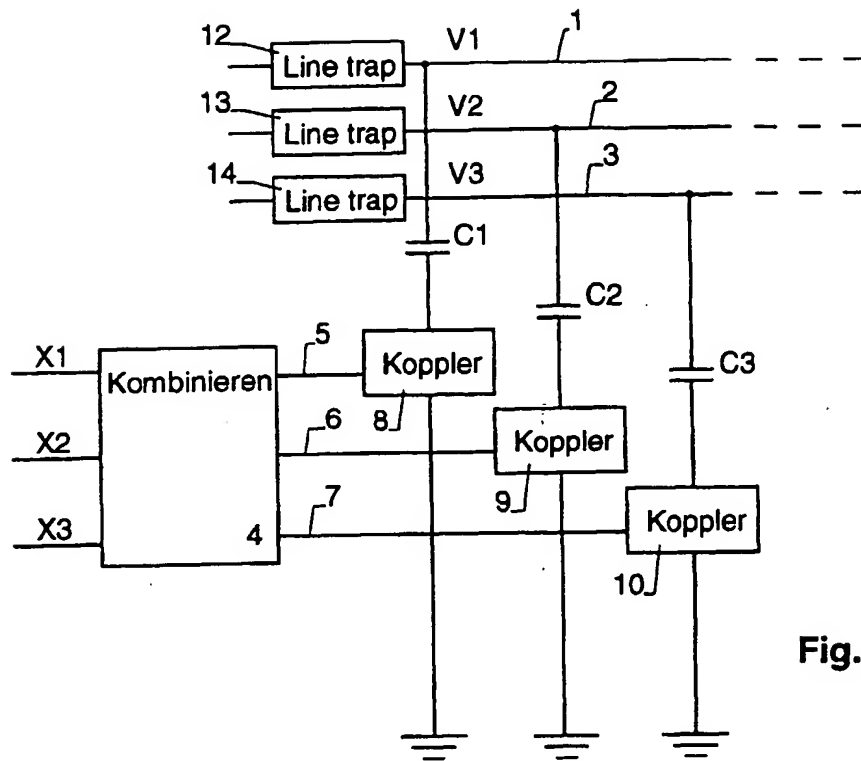


Fig. 1

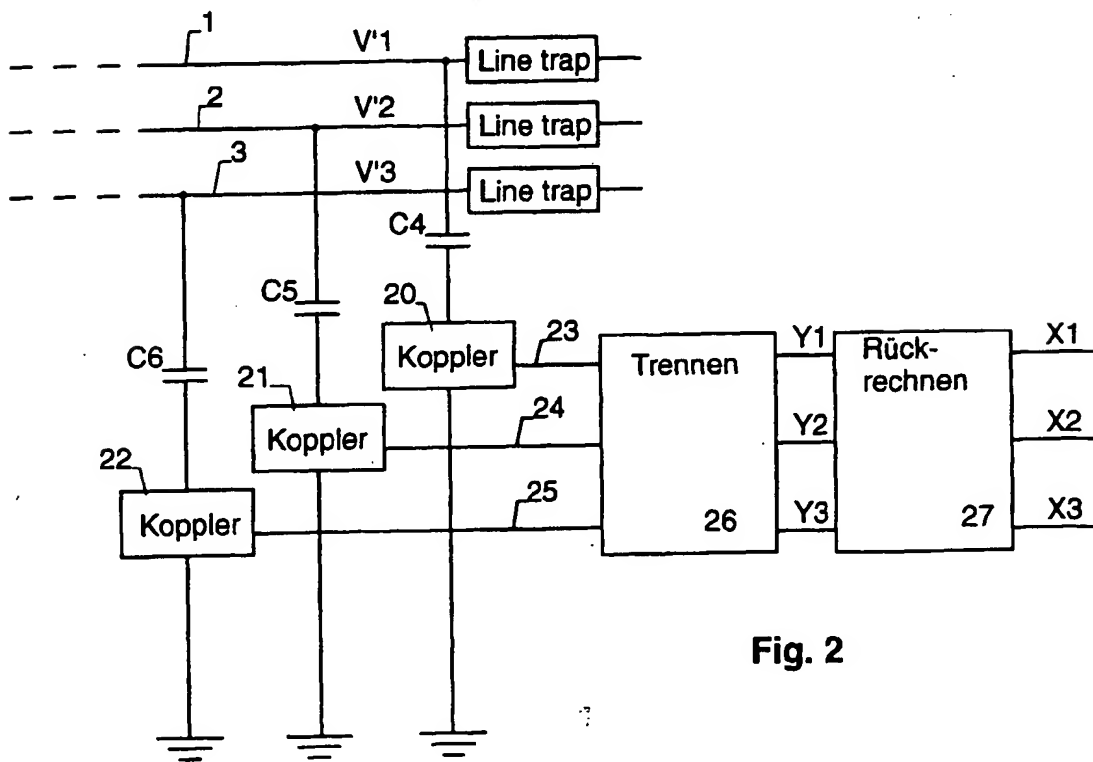


Fig. 2